DOI: 10.13930/j.cnki.cjea.151266

# 套作大豆形态、光合特征对玉米荫蔽及光照恢复的响应*

范元芳 杨 峰** 何知舟 王 锐 刘沁林
袁小琴 雍太文 武晓玲 杨文钰**

(四川农业大学农学院/农业部西南作物生理生态与耕作重点实验室 成都 611130)

**摘 要** 为探寻大豆在荫蔽胁迫及光照恢复后的形态建成和光合生理的响应策略，选用'简阳九月黄'、'江浦黑豆'和'永胜黑豆' 3 个大豆材料，以单作和玉米–大豆带状套作种植模式为研究对象，分析套作荫蔽及光照恢复后大豆形态特征、光合速率、叶片解剖结构、光合色素含量等参数的响应特征。结果表明：套作种植下，大豆在第 5 片复叶展开(V5)期明显受玉米荫蔽胁迫，与单作大豆相比，株高显著增加，茎粗和地上部分生物量显著降低；其茎、叶和柄生物量分别是地上部生物量的 58%、37%和 6%，而单作下分别为 36%、50%和 14%，套作荫蔽下大豆的地上部分生物量分配中心由叶片改变为茎秆。同时，叶片厚度、栅栏组织厚度、海绵组织厚度、叶绿素 a 含量、叶绿素 a/b 及净光合速率下降，但叶绿素 b 含量和栅栏组织厚度/海绵组织厚度比值增加。玉米收获解除荫蔽胁迫后，在大豆鼓粒期(R6)，株高、茎粗、叶面积和地上部分生物量积累与单作的差异缩小，茎、叶和柄生物量为地上部生物量的 41%、49%和 10%；叶片、栅栏组织和海绵组织厚度比 V5 期(玉豆共生期)分别增加 117%、99%和 81%；光合色素与单作相比差异不显著，但净光合速率显著低于单作。玉米–大豆带状套作下的 3 个大豆材料的单株产量差异较大，'简阳九月黄'、'江浦黑豆'和'永胜黑豆'的单株产量分别较单作下降 33%、64%和 40%。因此，大豆能够通过形态、光合生理特征的可塑性来适应光环境，但品种间存在差异。

**关键词** 大豆 带状套作 荫蔽 光照恢复 光合生理生态 形态特征
**中图分类号:** S565.1; S311 **文献标识码:** A **文章编号:** 1671-3990(2016)05-0608-10

# Effects of shading and light recovery on soybean morphology and photosynthetic characteristics in soybean-maize intercropping system*

FAN Yuanfang, YANG Feng**, HE Zhizhou, WANG Rui, LIU Qinlin,
YUAN Xiaoqin, YONG Taiwen, WU Xiaoling, YANG Wenyu**

(College of Agronomy, Sichuan Agricultural University / Key Laboratory of Crop Ecophysiology and Farming System in Southwest China, Ministry of Agriculture, Chengdu 611130, China)

**Abstract** Light environment directly affects crop growth, resulting in yield change. Three soybean varieties were used to investigate the characteristics of morphology and photosynthetic physiology under shading and light recovery conditions to explore response of soybean to light environment change. Relay strip intercropping with maize and monoculture planting patterns of soybean were investigated in term of light environment. Morphological characteristics, net photosynthetic rate, leaf anatomical structure and chlorophyll content of soybean were analyzed in the study. The results indicated that stem diameter, biomass, leaf thickness (including palisade and spongy tissues), chlorophyll a content, chlorophyll a/b and net photosynthetic rate of soybean decreased significantly at V5 stage (symbiotic period of maize and soybean) in relay intercropping compared with monoculture systems. The results of plant height, chlorophyll b content and thickness ratio between palisade and spongy

* 国家自然科学基金项目(31571615)、农业部公益性行业科研专项资金项目(201203096)和四川省教育厅重点项目(16ZA0041)资助
** 通讯作者: 杨峰，主要研究方向为作物生理生态及信息农业，E-mail: f.yang@sicau.edu.cn；杨文钰，主要研究方向为玉米–大豆带状复合种植理论与技术研究，E-mail: mssiyangwy@sicau.edu.cn
范元芳，主要研究方向为作物生理生态。E-mail: 851301600@qq.com
收稿日期: 2015–11–29 接受日期: 2015–12–29
* The study was supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 31571615), the Special Funds for Ago-scientific Research in the Public Interest (No. 201203096) and the Major Project of Education Department in Sichuan (No. 16ZA0041).
** Corresponding author: YANG Feng, E-mail: f.yang@sicau.edu.cn; YANG Wenyu, E-mail: mssiyangwy@sicau.edu.cn
Accepted Nov. 29, 2015; accepted Dec. 29, 2015

tissue were the reverse for intercropping. In addition, the fractions of stem, leaf and stripe biomass accounted for 58%, 37% and 6%, respectively, of total above-ground biomass under relay intercropping, and 36%, 50% and 14% under mono-cropping. The results revealed that dry matter production center was transformed from leaves to stems under shading condition. When shading was removed after maize harvest, the differences among plant height, stem diameter, leaf area and biomass accumulation of above-ground biomass of soybean decreased at seed-filling stage of soybean (R6) between relay intercropping and monoculture treatments. The fractions of stem, leaf and stipe of total biomass were 41%, 49% and 10%, respectively. The thickness of leaf, palisade tissue and spongy tissue increased by 117%, 99% and 81%, respectively, compared with those at V5 stage (symbiotic period of maize and soybean). There was no significant difference in photosynthetic pigments between relay intercropping and monoculture after light recovery in relay intercropping. Photosynthetic rate of intercropped soybean significantly decreased, compared with that of mono-cropping. The yields of the three soybean varieties had significant difference in relay strip intercropping. Relay strip intercropping decreased per-plant yields of soybean varieties of 'Jianyangjiuyuehuang', 'Jiangpuheidou' and 'Yongshengheidou' by 33%, 64% and 40%, respectively, compared with soybean monoculture. It was therefore concluded that soybean was adaptable to changes in light environment due to plasticity in morphology and photosynthetic physiology. There were, however, differences in plasticity between different varieties.

**Keywords**　Soybean; Relay strip intercropping; Shading; Light recovery; Photosynthetically physiological characteristics; Morphological characteristics



大豆(*Glycine max*)是世界上种植面积最大的油粮饲兼用作物之一，在我国的饮食结构中占有重要地位。随着科技发展，大豆以其优良的营养价值，在食品、油脂等方面的需求猛增。2003 年之后，中国进口大豆数量逐年增加，2014 年总产量达到 1 220 万 t，较上年增加 2.1%[1−3]。但大豆消费稳步增长，国内产量严重供不应求，进口量创历史新高，如何增加大豆面积，提高国内大豆产量迫在眉睫。在我国人口增加、耕地面积急剧下降的背景下，利用生物多样性原理进行间套作大豆栽培是提高土地利用率、增加大豆播种面积和产量的重要途径之一[4−5]。近年来，玉米–大豆带状间套作模式发展迅速，具有经济效益高、社会效益突出等特点，在保证玉米产量的前提下，有效地提高了大豆种植面积和产量[6]。国务院办公厅印发的《关于加快转变农业发展方式的意见(国办发[2015]59 号)》明确提出重点在黄淮海及西南地区推广玉米–大豆间套作。

在玉米–大豆带状套作系统中，由于田间配置和品种选择的差异对大豆产量影响很大[7−10]。因此明确不同大豆材料形态、光合生理特征对荫蔽的响应策略，对筛选和培育适宜的大豆材料，提高大豆产量具有重要的理论指导意义。目前，关于弱光条件下大豆形态及光合生理变化特征的研究较多，已有的研究表明随着光照强度的降低，株高显著增加，茎粗和地上部生物量降低，叶绿素 a 和叶绿素 b 含量呈先下降再上升的趋势，而净光合速率($P_n$)呈先上升后下降的趋势[11−12]；李瑞等[13]研究表明随着遮阴程度增加，大豆幼苗叶片的叶绿素含量和叶绿素 a/b 值下降，净光合速率($P_n$)呈先升后降趋势。但关于大豆在荫蔽胁迫及光照恢复后的形态、光合生理的响应策略及可塑性研究较少。因此，本研究选用 3 个耐荫性有差异的大豆材料，以玉米–大豆带状套作模式为研究对象，分析大豆形态特征、叶片结构及光合参数在玉米和大豆共生期的荫蔽及玉米收获后光照恢复条件下变化规律，探讨大豆对光环境变化的响应策略，旨在为玉米–大豆套作大豆品种筛选及推广应用提供理论依据。

## 1　材料与方法

### 1.1　试验设计

试验于 2014 年在四川农业大学仁寿县珠嘉乡现代粮食生产示范基地(N30°4′16″, E104°12′53″)进行，该区海拔 482 m，属亚热带季风湿润气候区，年均气温 17.4 ℃，年均降雨 1 009.4 mm，年均日照 1 196.6 h，无霜期 312 d，试验地土壤为紫色黏土，pH 为 6.8。

试验采用随机区组设计，3 次重复，共计 18 个小区。选取来自 3 个省份耐阴有差异的大豆品种：四川简阳的'简阳九月黄'，江苏南京的'江浦黑豆'和云南丽江的'永胜黑豆'。大豆采用单作和玉米–大豆带状套作两种方式种植(图 1)。玉米–大豆套作下，玉米于 3 月 27 日育苗，4 月 10 日移栽，采用宽窄行种植，带宽 200 cm，宽行行距 150 cm，窄行行距 50 cm，8 月 10 日收获；大豆于 6 月 17 日播于玉米宽行中，行距 50 cm，穴留 2 株，10 月 21 日收获。大豆单作采用等行距种植，行距 50 cm，穴留 1 株。套作大豆种植密度为 100 050 株·hm$^{-2}$，大豆单作与套作密度相同。基肥配施尿素 75 kg·hm$^{-2}$，过磷酸钙 600 kg·hm$^{-2}$，氯化钾 60 kg·hm$^{-2}$，追肥为初花后施尿素 75 kg·hm$^{-2}$，其他田间管理措施同大田生产。

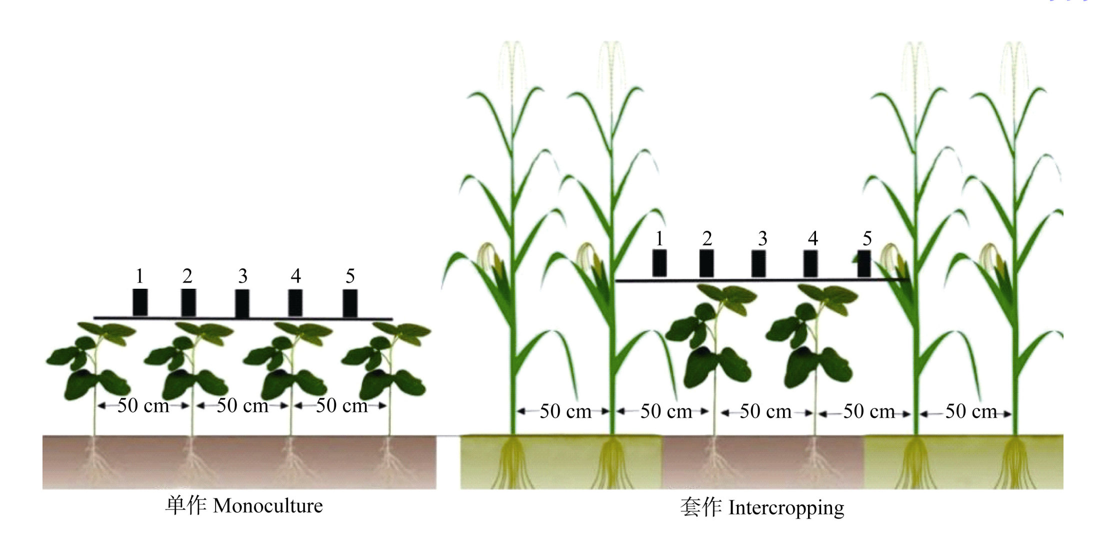



**图 1　玉米–大豆带状套作系统和单作系统及其光合有效辐射(PAR)传感器测定位点示意图**

Fig. 1　Diagrammatic representations of maize-soybean relay strip intercropping and soybean monocropping systems and layout of photosynthetically active radiation (PAR) sensors

1、2、3、4 和 5 黑色柱为 PAR 探测杆探测位点。1, 2, 3, 4 and 5 show positions of PAR (photosynthetically active radiation) sensors.



### 1.2　测定项目与方法

#### 1.2.1　大豆冠层光环境

在玉米大豆共生期，于大豆 V5 期，利用 LI-1400 光量子仪(美国 LI-COR 公司)在晴天的 9:00—17:00 每隔两小时测定大豆冠层光合有效辐射日变化。利用 LI-1400 光合有效辐射探测杆沿着大豆冠层顶部由西向东在 1、2、3、4、5 位点测定(图 1)，每个品种 3 次重复[9]，计算其平均值。

#### 1.2.2　形态参数及生物量

在大豆 V5 期(玉米大豆共生，大豆第 5 片复叶完全展开时)和 R6 期(鼓粒期，玉米已收获，玉米秆被从基部割倒，大豆处于解除荫蔽胁迫后的恢复期)每个处理挑选具有代表性的大豆植株 5 株，测定其株高、茎粗和单株叶面积等，随后将茎、叶、叶柄分别装入纸袋，于 105 ℃下杀青 30 min 后，在 80 ℃烘箱烘干至恒重后称其生物量[14]。

#### 1.2.3　大豆叶片的解剖结构

在大豆 V5 和 R6 期，选择各处理具有代表性大豆植株 3 株的功能叶片(倒 3 复叶的中间小叶)，在靠近主脉基部的 1/3 处取材(5 mm×5 mm 左右)，用标准固定液(FAA)固定保存，用酒精和正丁醇系列脱水，石蜡包埋，采用德国产的 Leica 切片机切片，横切片厚度为 10 μm，用松节油和酒精系列脱蜡、复水后进行番红染色，中性树胶封片，采用 Nikon eclipse50i 型显微镜观察切片组织和细胞排列情况，并用 ACT-2U 成像系统进行显微照相及分析[15]。

#### 1.2.4　净光合速率和叶绿素含量

在大豆 V5、R6 期每个处理分别选取具有代表性长势均匀的大豆植株 5 株，在晴天的 9:00—11:00 用 LI-6400(美国 LI-COR 公司)便携式光合仪在田间测定大豆植株功能叶片(倒 3 叶中间小叶)的净光合速率($P_n$)，每个处理共测定 15 片叶片。随后，参考 Arnon 方法[16]，选取大豆植株的倒 3 叶，用直径为 14.17 mm 的打孔器将每张大豆复叶的中间小叶片打孔 2 个，放入 10 mL 80%丙酮溶液中，常温下暗处浸提 24 h，在 663 nm 和 645 nm 波长下比色，所得的 OD 值代入公式计算浸提液中叶绿素 a 含量、叶绿素 b 含量。每个处理重复 3 次。

#### 1.2.5　产量及产量构成因素

在大豆成熟时，每个小区连续取 10 株大豆，自然风干后统计单株荚数、单株粒数、百粒重和单株产量。

### 1.3　数据分析

采用 Microsoft Excel 2013 软件整理数据和作图，SPSS 17.0 软件进行统计分析。

## 2　结果与分析

### 2.1　套作条件下大豆冠层光环境

由图 2 可以看出，从 9:00 至 17:00，单作和套作种植下的大豆冠层光合有效辐射呈先增加后下降趋势。与单作大豆相比，套作大豆冠层光合有效辐射平均下降 50%左右，在 11:00—13:00 趋于稳定维持在 1 200 $\mu mol\cdot m^{-2}\cdot s^{-1}$ 左右，而单作大豆冠层光合有效辐射最大值则达 1 900 $\mu mol\cdot m^{-2}\cdot s^{-1}$。

### 2.2　套作条件下荫蔽及光照恢复对大豆形态特征和生物量积累的影响

由表 1 可见，玉米–大豆套作条件下荫蔽对 3 个

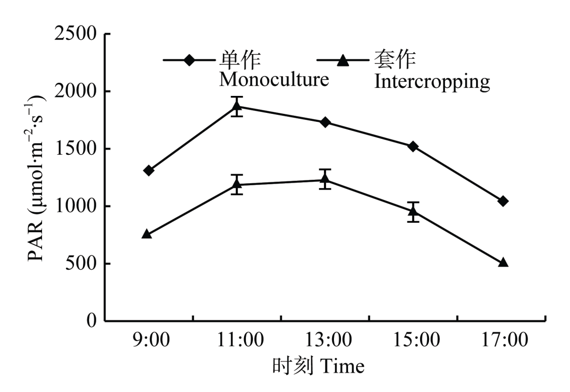



图 2　套作和单作条件下大豆冠层光合有效辐射(PAR)的日变化

Fig. 2　Diurnal variations of photosynthetically active radiation (PAR) of soybean canopy under relay intercropping and monoculture conditions

不同大豆材料的株高、茎粗、单株叶面积均有明显的影响。在大豆 V5 期(玉米和大豆共生期)套作种植下各大豆材料的株高显著高于单作，而茎粗和叶面积均低于单作。对于不同大豆材料而言，‘江浦黑豆’株高为最高，比单作增加了 2.2 倍，茎粗和叶面积均为最低，分别比单作低 48.9%和 84.6%。在 R6 期(玉米已收获，光照恢复时期)，3 个大豆材料在套作条件下形态特征与单作相比均有一定恢复。其中，‘简阳九月黄’的株高和茎粗与单作比差异不显著，‘江浦黑豆’株高比单作高 27.6%，而‘永胜黑豆’株高比单作低 32.2%；同样，‘永胜黑豆’的茎粗和叶面积比单作分别降低 52.9%和 75.5%。

表 1　套作条件下荫蔽和光照恢复对不同品种大豆形态特征及各器官生物量的影响

Table 1　Effects of shading and light recovery on morphological characteristics, biomass accumulation of stem, leaf and petiole of different soybean varieties under intercropping and monoculture conditions

| 时期 Period | 指标 Index | 简阳九月黄 Jianyangjiuyuehuang | | 江浦黑豆 Jiangpuheidou | | 永胜黑豆 Yongshengheidou | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | 单作 Monoculture | 套作 Intercropping | 单作 Monoculture | 套作 Intercropping | 单作 Monoculture | 套作 Intercropping |
| 共生期 Symbiotic period (shading period) | 株高 Plant height (cm) | 46.13±1.89a | 51.03±1.37a | 24.17±7.17b | 77.37±2.90a | 41.90±3.40b | 62.80±4.41a |
| | 茎粗 Stem diameter (mm) | 4.71±0.25a | 2.04±0.06b | 3.67±0.38a | 1.88±0.15b | 3.75±0.33a | 2.33±0.22b |
| | 叶面积 Leaf area ($cm^2$) | 427.80±12.07a | 130.62±13.30b | 376.93±5.68a | 58.10±8.28b | 453.19±31.40a | 122.55±4.95b |
| | 茎生物量 Stem biomass (g) | 1.30±0.04a | 0.18±0.03b | 0.97±0.10a | 0.20±0.03b | 0.95±0.11a | 0.23±0.03b |
| | 叶生物量 Leaf biomass (g) | 1.41±0.12a | 0.11±0.03b | 1.21±0.14a | 0.12±0.02b | 1.66±0.07a | 0.16±0.05b |
| | 柄生物量 Petiole biomass (g) | 0.46±0.04a | 0.03±0.01b | 0.40±0.08a | 0.01±0.00b | 0.38±0.10a | 0.03±0.00b |
| | 茎生物量比 Stem biomass ratio | 0.41±0.02a | 0.58±0.07a | 0.38±0.04b | 0.60±0.04a | 0.32±0.02a | 0.55±0.04a |
| | 叶生物量比 Leaf biomass ratio | 0.45±0.03a | 0.34±0.07a | 0.47±0.03a | 0.36±0.05b | 0.56±0.03a | 0.39±0.04b |
| | 柄生物量比 Petiole biomass ratio | 0.15±0.01a | 0.08±0.00b | 0.16±0.02a | 0.04±0.00b | 0.13±0.02a | 0.07±0.01a |
| 恢复期 Light recovery period | 株高 Plant height (cm) | 90.67±6.05a | 89.97±10.85a | 69.93±5.34b | 89.23±9.21a | 109.60±5.96a | 74.26±7.76b |
| | 茎粗 Stem diameter (mm) | 7.62±0.65a | 6.86±0.24a | 7.68±0.57a | 4.09±0.53b | 9.67±0.27a | 4.55±0.50b |
| | 叶面积 Leaf area ($cm^2$) | 745.25±13.83a | 280.49±28.33b | 753.99±13.59a | 198.98±22.94b | 1 028.28±15.37a | 252.39±13.23b |
| | 茎生物量 Stem biomass (g) | 12.75±1.64a | 3.47±0.13b | 8.19±0.89a | 2.82±0.75b | 24.60±1.96a | 3.73±0.85b |
| | 叶生物量 Leaf biomass (g) | 13.06±1.79a | 7.02±0.50b | 7.31±0.58a | 2.50±0.15b | 24.31±1.56a | 3.60±0.75b |
| | 柄生物量 Petiole biomass (g) | 4.93±0.80a | 1.75±0.63b | 2.77±0.92a | 0.35±0.16b | 7.21±0.86a | 0.68±0.16b |
| | 茎生物量比 Stem biomass ratio | 0.42±0.01a | 0.29±0.03b | 0.45±0.02b | 0.49±0.05ab | 0.44±0.02a | 0.47±0.09a |
| | 叶生物量比 Leaf biomass ratio | 0.43±0.03b | 0.57±0.01a | 0.40±0.02ab | 0.45±0.07a | 0.43±0.03a | 0.45±0.08a |
| | 柄生物量比 Petiole biomass ratio | 0.16±0.02a | 0.14±0.04a | 0.15±0.03a | 0.06±0.02b | 0.128±0.01a | 0.08±0.01a |

同行同一品种不同小写字母分别表示在 0.05 水平间作与单作差异显著，下同。Different lowercase letters in the same line for the same variety indicate significant difference between intercropping and monoculture at 0.05 level. The same below.

生物量积累可用来衡量光合生产力[17]。由表 1 可知，在玉米–大豆共生期，大豆植株地上部分各器官生物量积累量均显著低于单作种植，约占单作的 10%左右。3 个大豆材料的地上部分生物量积累总体表现为‘简阳九月黄’<‘江浦黑豆’<‘永胜黑豆’。不同种植条件下，各大豆材料地上生物量分配存在显著差异，在玉米–大豆共生期，套作处理大豆茎、叶和叶柄的生物量分配比例平均为 57.7%、36.3%和 6.3%，而单作下分别为 37.0%、49.3%和 14.7%，套作种植下地上部分生物量分配中心由叶片转变为茎秆。在玉米收获后，大豆 R6 期(鼓粒期)，各大豆材料地上部分生物量积累在一定程度上得到恢复，株高、茎粗、叶面积和地上部分生物量积累与单作之间的差异明显缩小，茎、叶和叶柄生物量分配比例为 41.7%、49.0% 和 9.3%，恢复程度顺序为‘简阳九月黄’>‘永胜黑豆’>‘江浦黑豆’。

**2.3 套作条件下荫蔽及光照恢复对大豆叶片解剖结构的影响**

由图 3 可知，大豆叶片类型属于异面叶，叶肉组织分化为明显的栅栏组织和海绵组织，但 3 个大豆材料的叶片解剖结构在单作和套作条件下差异显著。根据表 2 对叶片结构的量化可知，在大豆 V5 期，套作条件下由于玉米对大豆的荫蔽作用，与单作大豆相比，套作下 3 个大豆材料的叶片厚度分别降低了 41.5%、34.8%和 27.7%；表皮细胞厚度平均降低 25%左右，栅栏组织和海绵组织分化较弱，细胞排列疏松，细胞间隙增大，栅栏组织厚度分别低于对照 47.9%、36.0%和 34.2%；海绵组织厚度分别低于对照 59.8%、38.1%和 21.8%，但'简阳九月黄'和'江浦黑豆'的栅海比增加了 25%和 4%，'永胜黑豆'的则下降了 16.8%。在大豆 R6 期(玉米已收获)，3 个大豆材料在套作下的叶片组织解剖结构与 V5 期(玉米–大豆共生期)相比明显在一定程度上得到恢复，3 个大豆品种的叶片厚度恢复为对照的 78.7%、73.7%和 94.5%；'简阳九月黄'、'江浦黑豆'的栅海比均高于单作，分别为对照的 100.7%和 111.6%，'永胜黑豆'的则为对照的 87.5%。

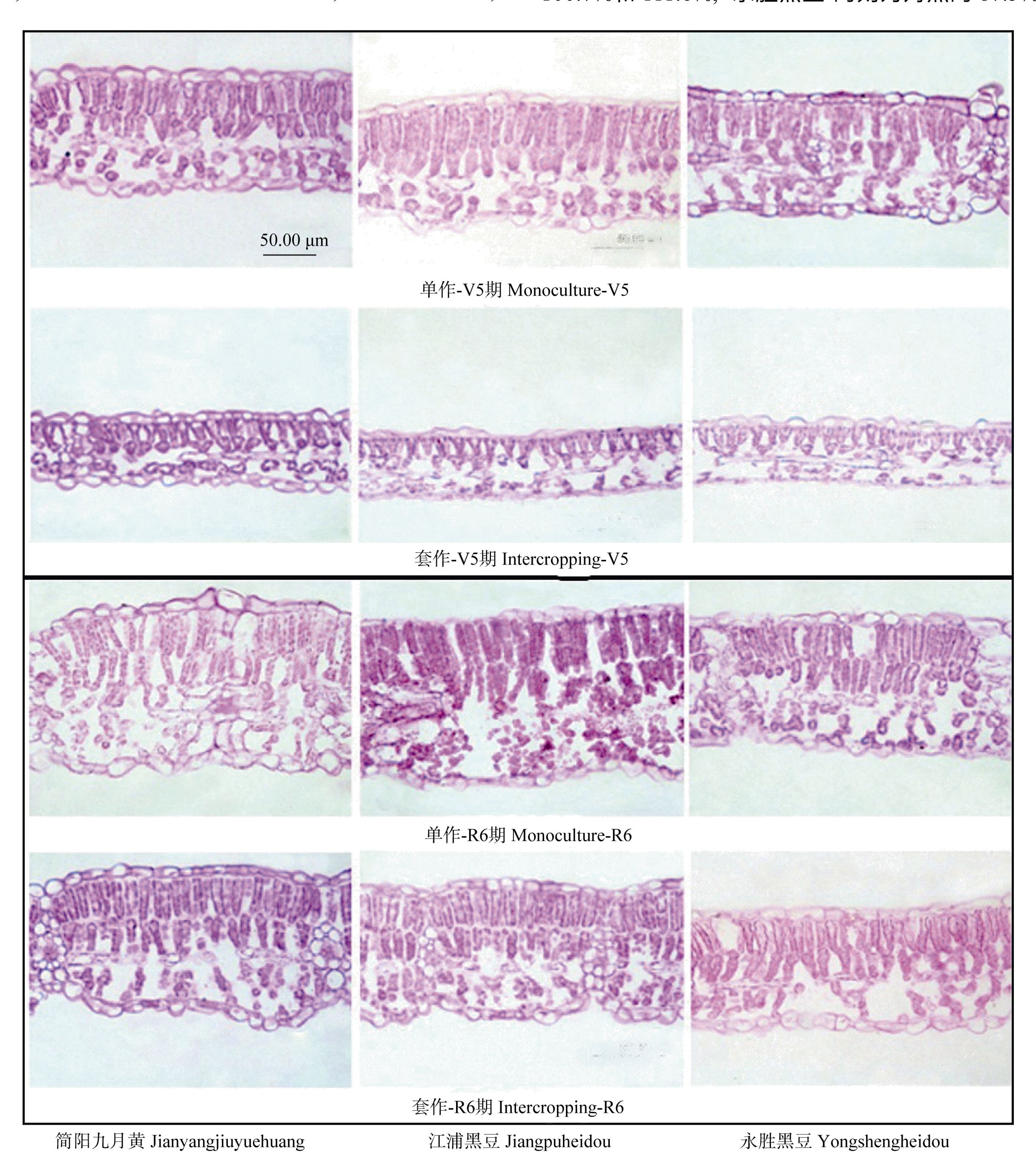



**图 3 套作条件下荫蔽(V5 期)和光照恢复(R6 期)下的不同大豆品种叶片解剖结构图(×400)**

Fig. 3 Leaf anatomical structures of different soybean varieties under shading (at V5 stage) and light recovery (at R6 stage) conditions (×400)

表 2　套作条件下荫蔽和光照恢复对不同大豆品种叶片解剖结构的影响

Table 2　Effects of shading and light recovery on leaf anatomical structure parameters of different soybean varieties under intercropping and monoculture conditions

| 时期 Period | 指标 Index | 简阳九月黄 Jianyangjiuyuehuang | | 江浦黑豆 Jiangpuheidou | | 永胜黑豆 Yongshengheidou | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | 单作 Monoculture | 套作 Intercropping | 单作 Monoculture | 套作 Intercropping | 单作 Monoculture | 套作 Intercropping |
| 共生期 Symbiotic period (shading period) | 上表皮厚度 Upper epidermis thickness (μm) | 10.60±1.58a | 10.15±1.89a | 10.15±1.10a | 8.09±1.19b | 10.15±0.86a | 7.66±1.13b |
| | 下表皮厚度 Lower epidermis thickness (μm) | 10.79±1.32a | 8.52±1.17 b | 10.04±0.98a | 7.12±0.84b | 11.01±1.59a | 7.25±1.34b |
| | 栅栏组织厚度 Palisade tissue thickness (μm) | 51.79±3.11a | 26.97±5.03c | 46.50±1.91a | 29.77±2.62b | 51.68±4.30a | 33.99±2.61b |
| | 海绵组织厚度 Spongy tissue thickness (μm) | 45.91±3.20a | 18.45±3.67b | 37.98±2.50a | 23.52±2.98b | 38.51±5.30a | 30.11±3.71b |
| | 叶片厚度 Leaf thickness (μm) | 116.08±9.87a | 67.86±4.31c | 108.75±3.94a | 70.87±4.45b | 111.44±5.80a | 80.59±4.32b |
| | 栅海比 Palisade tissue/spongy tissue | 1.19±0.28a | 1.49±0.28a | 1.23±0.06a | 1.28±0.20a | 1.37±0.25ab | 1.14±0.16b |
| 恢复期 Light recovery period | 上表皮厚度 Upper epidermis thickness (μm) | 10.81±1.24a | 11.80±1.98a | 9.95±1.36a | 10.36±0.98a | 11.55±1.23a | 9.82±1.32b |
| | 下表皮厚度 Lower epidermis thickness (μm) | 11.90±2.43a | 11.12±2.24ab | 10.36±0.85a | 10.24±1.20a | 11.02±1.19a | 9.82±1.02a |
| | 栅栏组织厚度 Palisade tissue thickness (μm) | 89.36±4.62a | 67.97±4.66b | 89.78±3.61a | 66.13±2.64b | 66.57±4.07a | 59.91±4.71b |
| | 海绵组织厚度 Spongy tissue thickness (μm) | 63.54±4.05a | 48.01±3.57b | 65.37±3.22a | 43.58±4.48b | 43.80±3.01a | 45.31±4.06a |
| | 叶片厚度 Leaf thickness (μm) | 174.45±7.08a | 137.33±6.46b | 175.96±5.00a | 129.68±4.04b | 135.50±5.47a | 128.05±5.63b |
| | 栅海比 Palisade tissue/spongy tissue | 1.41±0.10a | 1.42±0.13a | 1.38±0.14a | 1.54±0.20a | 1.52±0.12a | 1.33±0.09b |

## 2.4　套作条件下荫蔽及光照恢复对大豆叶绿素和净光合速率的影响

叶绿素含量是衡量叶片对光能吸收强弱的指标之一[18]。由表 3 可知，玉米和大豆共生期大豆叶绿素 a 含量、叶绿素 a/b 比值及净光合速率显著降低($P$<0.05)，而叶绿素 b 含量增加。在大豆 R6 期(玉米收获后)，3 个大豆材料在单作和玉米–大豆套作种植条件下的叶绿素 a 含量和叶绿素 b 含量差异均不显著($P$>0.05)。但套作大豆叶片的叶绿素 a 含量和叶绿素 b 含量高于单作大豆，‘简阳九月黄’和‘江浦黑豆’的叶绿素 a/b 比值相对净作而言有所下降而‘永胜黑豆’的叶绿素 a/b 比值略微升高但均未达到差异水平。光照恢复后单作和玉米–大豆套作的大豆净光合速率变化规律与共生期一致。

表 3　套作条件下荫蔽和光照恢复对不同大豆品种光合色素含量及净光合速率的影响

Table 3　Effects of shading and light recovery on photosynthetic pigments and photosynthetic rate of different soybean varieties under intercropping and monoculture conditions

| 时期 Period | 指标 Index | 简阳九月黄 Jianyangjiuyuehuang | | 江浦黑豆 Jiangpuheidou | | 永胜黑豆 Yongshengheidou | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | 单作 Monoculture | 套作 Intercropping | 单作 Monoculture | 套作 Intercropping | 单作 Monoculture | 套作 Intercropping |
| 共生期 Symbiotic period (shading period) | 叶绿素 a 含量 Chlorophyll a content (mg·dm$^{-2}$) | 3.587±0.021a | 2.004±0.215b | 3.681±0.056a | 2.249±0.230b | 3.542±0.234a | 1.468±0.153b |
| | 叶绿素 b 含量 Chlorophyll b content (mg·dm$^{-2}$) | 0.507±0.009b | 0.946±0.044a | 0.604±0.029b | 0.925±0.079a | 0.560±0.039b | 0.793±0.062a |
| | 叶绿素 a/b Chlorophyll a/b | 7.071±0.118a | 2.118±0.316b | 6.094±0.204a | 2.432±0.417b | 6.361±0.750a | 1.851±0.328b |
| | 净光合速率 Photosynthetic rate (μmol·m$^{-2}$·s$^{-1}$) | 20.08±0.823a | 16.63±0.252b | 19.06±0.191a | 16.39±0.419b | 19.79±0.780a | 14.08±0.690b |
| 恢复期 Light recovery period | 叶绿素 a 含量 Chlorophyll a content (mg·dm$^{-2}$) | 3.056±0.210a | 3.156±0.291a | 2.839±0.423a | 3.189±0.454a | 2.577±0.478a | 2.820±0.457a |
| | 叶绿素 b 含量 Chlorophyll b content (mg·dm$^{-2}$) | 0.657±0.072a | 0.782±0.070a | 0.708±0.055a | 0.758±0.026a | 0.646±0.093a | 0.713±0.029a |
| | 叶绿素 a/b Chlorophyll a/b | 3.650±0.881a | 3.454±0.376a | 3.546±0.224a | 3.508±0.321a | 3.508±0.393a | 4.136±0.371a |
| | 净光合速率 Photosynthetic rate (μmol·m$^{-2}$·s$^{-1}$) | 22.368±0.360a | 18.491±0.236b | 20.991±0.690a | 17.999±0.156b | 21.171±0.815a | 17.873±0.109b |

## 2.5　套作条件下荫蔽及光照恢复对大豆产量构成因素的影响

从表 4 看出，套作荫蔽对大豆产量和产量构成因素的影响有明显的规律，3 个大豆品种的单株荚数、单株粒数和单株产量表现出一致规律性，均显著低于单作，单株荚数、单株粒数、百粒重和单株产量一致表现为‘简阳九月黄’>‘永胜黑豆’>‘江浦黑豆’，‘简阳九月黄’的单株产量最高为 13.61 g，其次是‘永胜黑豆’为 9.98 g，‘江浦黑豆’最低为 4.90 g。

表 4 套作条件下荫蔽和光照恢复对大豆产量及产量构成的影响
Table 4 Effects of shading and light recovery on yield and yield components of different soybean varieties under intercropping and monoculture conditions

| 品种<br>Variety | 处理<br>Treatment | 单株荚数<br>Pods per plant | 单株粒数<br>Seeds per plant | 百粒重<br>100-seeds weight (g) | 单株产量<br>Yield per plant (g) |
|---|---|---|---|---|---|
| 简阳九月黄<br>Jianyangjiuyuehuang | 单作 Monoculture | 83.33±4.51a | 152.67±5.03a | 20.55±1.09a | 20.25±0.67a |
| | 套作 Intercropping | 69.00±5.20ab | 118.67±3.51b | 17.45±1.29b | 13.61±0.40b |
| 江浦黑豆<br>Jiangpuheidou | 单作 Monoculture | 47.67±9.71a | 82.33±5.03a | 15.76±0.97a | 13.54±0.83a |
| | 套作 Intercropping | 27.00±6.93b | 34.33±4.51b | 11.63±0.98b | 4.90±0.64b |
| 永胜黑豆<br>Yongshengheidou | 单作 Monoculture | 83.00±4.36a | 81.00±3.61a | 18.62±1.32a | 16.52±0.74a |
| | 套作 Intercropping | 48.00±3.00b | 73.67±3.06b | 15.00±1.37a | 9.98±1.03b |

## 3 讨论

### 3.1 套作条件下光环境对大豆形态及生物量的影响

当外界环境发生变化时，植物通过改变自身形态、结构和生理生化特性来适应环境，以便维持最佳的生长发育水平[19]。玉米–大豆带状套作下，荫蔽是影响大豆生产的重要因素之一，大豆植株地上部分生物量积累下降，而地上部生物量与产量显著相关[20–21]。本研究中在玉米与大豆共生期，大豆株高增加，茎粗和叶面积减小，地上部分生物量均降低约为单作的 10%，解除荫蔽胁迫后，3 个大豆材料地上部分生物量恢复为单作的 80%左右。生物量分配的调整是植物对环境的一种适应，当环境改变时植株会调整自身的生长策略[17,22]，影响个体发育和群体产量，不同产量潜力的品种在生物量累积过程中，其在根、茎、叶、荚的分配比例不同[15,23]。在本研究中，套作荫蔽下 3 个大豆材料各器官生物量主要分配于茎秆中，而单作下主要分配于叶片中。在光照恢复期，‘简阳九月黄’的地上部分生物量分配为叶>茎>柄，而‘江浦黑豆’、‘永胜黑豆’的地上部分生物量分配为茎>叶>柄，叶片是进行光合作用的主要场所，光合作用是植物干物质积累的来源且与产量有密切关系[24–25]，由此可以说明‘简阳九月黄’在光照恢复后能够迅速改变物质转运方向，增加自身的光合面积，提高后期的光合能力来增加大豆产量。

### 3.2 套作条件下光环境对大豆解剖结构的影响

叶片解剖结构能够反映植物对环境变化的响应，厚叶结构、发达的栅栏组织、排列紧密平直的表皮细胞是阳生叶的典型特征，而发达的海绵组织、凸透形的表皮细胞则是叶片对于弱光、水分充足的一种适应特性[26]。本研究中套作荫蔽下 3 个大豆材料的栅栏组织和海绵组织厚度均低于单作，栅栏组织厚度的降低主要是由栅栏组织细胞长度减小所致，细胞层数未发生变化，但细胞排列疏松，形状趋于短锥状或漏斗形，表皮细胞的细胞壁弧形弯曲趋于凸透形，这是植物对弱光环境的一种适应，可以降低散射光的反射，增加叶内光强度[27]，增强叶片细胞对光的捕获能力，有利于光辐射穿透叶表皮到达叶肉组织，提高光合能力[28]。由此可知，套作荫蔽下大豆具有明显的阴生叶特性，表现出对荫蔽环境的良好适应性。

栅海比是栅栏组织厚度与海绵组织厚度的比率，反映了栅栏组织的发达程度[29]。栅海比在果树矮化研究较多，叶片的栅海比越大，植株的矮化程度越高，果树的生长势越弱，树体趋于矮化[30]，张达等[31–33]认为栅海比不仅可作为矮化果树的筛选指标，也同样适用于矮化大豆的形态指标筛选。在本研究中，套作荫蔽下‘简阳九月黄’、‘江浦黑豆’的栅海比升高，说明其栅栏组织的发达程度较高；‘永胜黑豆’品种的栅海比显著降低，可能是由于其海绵组织较发达而导致栅海比较低，各大豆材料之间存在显著差异性。

### 3.3 套作条件下光环境对大豆光合特性的影响

在弱光环境中，植物叶片将会调整自身结构和生理特征来吸收利用更多的光来维持生长发育，如叶片变薄、叶面积变大[34]、光合色素含量增加[35–36]等。叶绿素是植物吸收与利用光能的主要色素，其含量的变化说明植物光合初始反应的优劣，叶绿素 a、叶绿素 b 含量都可吸收光能，但只有少数处于激发状态的叶绿素 a 可以将光能转化为电能，叶绿素 a/b 比值反映植物对光能利用的多少，阳生植物的叶绿素 a/b 比值较大，而阴生植物叶绿素 a/b 较小。弱光下叶绿素 b 含量增加有助于利用漫射光中占优势的较短波长的蓝紫光，从而提高捕光能力；同时叶绿素 b 含量的增加有利于捕光色素复合体 LHCP 含量的提高、调节激发能在光系统间的分配，提高大豆对弱光的适应性[18]。本文中套作荫蔽环境各大豆材料的单位面积叶绿素 a 含量、叶绿素 a/b 显著下降，

叶绿素 b 含量显著升高，通过增加叶绿素 b 含量来吸收更多的散射光提高光能的捕获能力。然而单株叶面积、叶片厚度的降低则使套作环境下大豆叶片的光截获面积降低而引起的光截获量下降。

光合能力是作物产量和品质形成的基础，由于玉米荫蔽导致大豆冠层光合有效辐射下降，引起大豆幼苗的净光合速率($P_n$)下降，这与前人的研究结果一致[37]。特别是大豆材料‘永胜黑豆’的光合能力下降幅度最大，可能与‘永胜黑豆’叶片中叶绿素含量的降低有关。玉米收获后大豆开始进入光照恢复期，3 个大豆材料的株高、茎粗、叶绿素 a 含量等参数均在一定程度上有所恢复，其中品种‘简阳九月黄’的恢复程度最好，适应弱光环境能力较强。由于荫蔽胁迫，大豆单株荚数下降，单株粒数随之降低，在供试品种中以‘简阳九月黄’的单株产量最高，这些结果与前人研究报道类似[8,38–39]。

## 4　结论

在玉米–大豆带状套作模式下，前期玉米的荫蔽改变了大豆冠层生长光环境，影响大豆植株形态、叶片解剖结构和光合特性，导致大豆株高和叶绿素 b 含量增加，而茎粗、叶面积、叶片厚度和地上部分生物量等下降。玉米收获后，大豆进入光照恢复时期，大豆的茎粗、地上部分生物量、叶绿素 a 含量、叶片厚度等迅速增加，为大豆后期光合补偿生长提供物质和能量基础。同时 3 个大豆材料形态及光合特性参数在荫蔽和光照恢复过程中响应程度不同，从产量角度分析大豆材料‘简阳九月黄’表现出较好的光适应性。因此，在玉米–大豆带状套作种植中，筛选前期耐荫性强，后期恢复力强的大豆品种(材料)，结合优化的群体配置，是实现玉米和大豆协调高产的关键。

## 参考文献　References


[1] 殷瑞锋，徐雪高，李登旺，等．中国大豆市场分析与未来 10 年展望[J]．农业展望, 2015, 11(5): 4–9
Yin R F, Xu X G, Li D W, et al. China’s soybean market and its prospect for the next decade[J]. Agricultural Outlook, 2015, 11(5): 4–9

[2] 徐雪高．大豆进口连创新高和我国的粮食安全[J]．现代经济探讨, 2013(10): 58–62
Xu X G. The import of soybean and the food security of our country[J]. Modern Economic Research, 2013(10): 58–62

[3] 杨文钰，雍太文，任万军，等．发展套作大豆，振兴大豆产业[J]．大豆科学, 2008, 27(1): 1–7
Yang W Y, Yong T W, Ren W J, et al. Develop relay-planting soybean, revitalize soybean industry[J]. Soybean Science, 2008, 27(1): 1–7

[4] Zhu Y Y, Chen H R, Fan J H, et al. Genetic diversity and disease control in rice[J]. Nature, 2000, 406(6797): 718–722

[5] Li L, Li S M, Sun J H, et al. Diversity enhances agricultural productivity via rhizosphere phosphorus facilitation on phosphorus-deficient soils[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2007, 104(27): 11192–11196

[6] 韩天富，吴存祥，常汝镇，等．大豆主导品种、主推技术及其推广应用[J]．大豆通报, 2008(2): 1–6
Han T F, Wu C X, Chang R Z, et al. Leading varieties of soybean, the main push technology and its application[J]. Soybean Bulletin, 2008(2): 1–6

[7] 王竹，杨文钰，伍晓燕，等．玉米株型和幅宽对套作大豆初花期形态建成及产量的影响[J]．应用生态学报, 2008, 19(2): 323–329
Wang Z, Yang W Y, Wu X Y, et al. Effects of maize plant type and planting width on the early morphological characters and yield of relay planted soybean[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2008, 19(2): 323–329

[8] 杨峰，娄莹，廖敦平，等．玉米–大豆带状套作行距配置对作物生物量、根系形态及产量的影响[J]．作物学报, 2015, 41(4): 642–650
Yang F, Lou Y, Liao D P, et al. Effects of row spacing on crop biomass, root morphology and yield in maize-soybean relay strip intercropping system[J]. Acta Agronomica Sinica, 2015, 41(4): 642–650

[9] 崔亮，苏本营，杨峰，等．不同玉米–大豆带状套作组合条件下光合有效辐射强度分布特征对大豆光合特性和产量的影响[J]．中国农业科学, 2014, 47(8): 1489–1501
Cui L, Su B Y, Yang F, et al. Effects of photo-synthetically active radiation on photosynthetic characteristics and yield of soybean in different maize/soybean relay strip intercropping systems[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2014, 47(8): 1489–1501

[10] 崔亮，苏本营，杨峰，等．带状套作大豆群体冠层光能截获与利用特征[J]．中国农业科学, 2015, 48(1): 43–54
Cui L, Su B Y, Yang F, et al. Relationship between light interception and light utilization of soybean canopy in relay strip intercropping system[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2015, 48(1): 43–54

[11] 武晓玲，张丽君，聂邵仙，等．弱光对大豆苗期生长及光合荧光特性的影响[J]．大豆科学, 2014, 33(1): 53–57
Wu X L, Zhang L J, Nie S X, et al. Effects of low light on growth and photosynthetic fluorescence characteristics in soybean seedling[J]. Soybean Science, 2014, 33(1): 53–57

[12] Su B Y, Song Y X, Song C, et al. Growth and photosynthetic responses of soybean seedlings to maize shading in relay intercropping system in Southwest China[J]. Photosynthetica, 2014, 52(3): 332–340

[13] 李瑞，文涛，唐艳萍，等．遮阴对大豆幼苗光合和荧光特性的影响[J]．草业学报, 2014, 23(6): 198–206
Li R, Wen T, Tang Y P, et al. Effect of shading on photosynthetic and chlorophyll fluorescence characteristics of soybean[J]. Acta Prataculturae Sinica, 2014, 23(6): 198–206

[14] 黄中文，赵团结，盖钧镒．大豆不同产量水平生物量积累

与分配的动态分析[J]. 作物学报, 2009, 35(8): 1483–1490
Huang Z W, Zhao T J, Gai J Y. Dynamic analysis of biomass accumulation and partition in soybean with different yield levels[J]. Acta Agronomica Sinica, 2009, 35(8): 1483–1490

[15] 杨虎彪, 李晓霞, 罗丽娟. 植物石蜡制片中透明和脱蜡技术的改良[J]. 植物学报, 2009, 44(2): 230–235
Yang H B, Li X X, Luo L J. An improved clearing and de-waxing method for plant paraffin sectioning[J]. Chinese Bulletin of Botany, 2009, 44(2): 230–235

[16] Arnon D I. Copper enzymes in isolated chloroplasts. Polyphenoloxidase in *Beta vulgaris*[J]. Plant physiology, 1949, 24(1): 1–15

[17] 李涛, 刘玉军, 白红彤, 等. 栽培密度对薄荷生长策略和光合特性的影响[J]. 植物生理学报, 2012, 48(9): 895–900
Li T, Liu Y J, Bai H T, et al. Effects of planting density on growth strategies and photosynthetic characteristics of *Mentha haplocalyx* briq[J]. Plant Physiology Journal, 2012, 48(9): 895–900

[18] 姚允聪, 王绍辉, 孔云. 弱光条件下桃叶片结构及光合特性与叶绿体超微结构变化[J]. 中国农业科学, 2007, 40(4): 855–863
Yao Y C, Wang S H, Kong Y. Characteristics of photosynthesis mechanism in different peach species under low light intensity[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2007, 40(4): 855–863

[19] Valladares F, Gianoli E, Gómez J M. Ecological limits to plant phenotypic plasticity[J]. New Phytologist, 2007, 176(4): 749–763

[20] 黄卫东, 吴兰坤, 战吉成. 中国矮樱桃叶片生长和光合作用对弱光环境的适应性调节[J]. 中国农业科学, 2004, 37(12): 1981–1985
Huang W D, Wu L K, Zhan J C. Growth and photosynthesis adaptation of dwarf-type Chinese cherry (*Prunus pseudocerasus* L. cv. Laiyang) leaves to weak light stress[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2004, 37(12): 1981–1985

[21] 王秋玲, 郭凌云, 刘艳, 等. 夏大豆单株产量与主要农艺性状的灰色关联度分析[J]. 安徽农业科学, 2002, 30(1): 26–27
Wang Q L, Guo L Y, Liu Y, et al. Analysis of gray related degree between individual plant yield and main agriculture character of summer soybean[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2002, 30(1): 26–27

[22] Jiang C D, Wang X, Gao H Y, et al. Systemic regulation of leaf anatomical structure, photosynthetic performance, and high-light tolerance in sorghum[J]. Plant Physiology, 2011, 155(3): 1416–1424

[23] Niklas K J, Enquist B J. Invariant scaling relationships for interspecific plant biomass production rates and body size[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2001, 98(5): 2922–2927

[24] 徐克章, 张治安, 刘振库, 等. 高粱叶片比叶重的变化与产量关系的研究[J]. 吉林农业大学学报, 1998, 20(2): 11–13
Xu K Z, Zhang Z A, Liu Z K, et al. Study on the relationship between specific weight and yield of kernels in sorghum[J]. Journal of Jilin Agricultural University, 1998, 20(2): 11–13

[25] 李伟, 眭晓蕾, 王绍辉, 等. 黄瓜幼苗不同叶位叶片光合特性对弱光的响应[J]. 中国农业科学, 2008, 41(11): 3698–3707
Li W, Sui X L, Wang S H, et al. Effects of low light on photosynthetic characteristics of different position leaves of cucumber seedlings[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2008, 41(11): 3698–3707

[26] 吴涛, 耿云芬, 柴勇, 等. 三叶爬山虎叶片解剖结构和光合生理特性对 3 种生境的响应[J]. 生态环境学报, 2014, 23(10): 1586–1592
Wu T, Geng Y F, Chai Y, et al. Response of leaf anatomical structure and photosynthesis characteristics of *Parthenocissus himalayana* to three habitat types[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2014, 23(10): 1586–1592

[27] Putz F E, Mooney H A. The Biology of Vines[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1991

[28] Roãcàas G, Scarano Fls R S, Barros C F. Leaf anatomical variation in *Alchornea triplinervia* (Spreng) Müll. Arg. (Euphorbiaceae) under distinct light and soil water regimes[J]. Botanical Journal of the Linnean Society, 2001, 136(2): 231–238

[29] 赵秀明, 王飞, 韩明玉, 等. 新引进苹果矮化砧木的叶片解剖结构及抗旱性[J]. 西北农林科技大学学报: 自然科学版, 2012, 40(5): 136–142
Zhao X M, Wang F, Han M Y, et al. Relationship between leaf anatomical structures and drought resistance of newly introduced apple dwarf rootstocks[J]. Journal of Northwest A&F University: Natural Science Edition, 2012, 40(5): 136–142

[30] 史宝胜, 徐继忠, 马宝焜, 等. 几种苹果矮化砧木枝条与叶片的解剖结构研究[J]. 河北林果研究, 2000, 15(4): 334–338
Shi B S, Xu J Z, Ma B K, et al. Studies on the anatomic structure of some apple dwarf stocks[J]. Hebei Journal of Forestry and Orchard Research, 2000, 15(4): 334–338

[31] 张达, 王豫颖, 苍晶, 等. 矮化大豆突变体叶片解剖结构及过氧化物酶活性研究[J]. 东北农业大学学报, 2008, 39(6): 67–72
Zhang D, Wang Y Y, Cang J, et al. Study on the anatomical structures of blades and peroxide enzyme activity in the dwarf mutant soybean[J]. Journal of Northeast Agricultural University, 2008, 39(6): 67–72

[32] 张达, 郝再彬, 王豫颖, 等. 矮化大豆突变体茎、叶的解剖学研究[J]. 大豆科学, 2008, 27(4): 599–603
Zhang D, Hao Z B, Wang Y Y, et al. Anatomy structures of leaves and stems in the dwarfing mutant soybean[J]. Soybean Science, 2008, 27(4): 599–603

[33] 覃凤飞, 李强, 崔棹茗, 等. 越冬期遮阴条件下 3 个不同秋眠型紫花苜蓿品种叶片解剖结构与其光生态适应性[J]. 植物生态学报, 2012, 36(4): 333–345
Qin F F, Li Q, Cui Z M, et al. Leaf anatomical structures and ecological adaptabilities to light of three alfalfa cultivars with different fall dormancies under shading during overwintering[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2012, 36(4): 333–345

[34] 王竹, 杨文钰, 吴其林. 玉/豆套作荫蔽对大豆光合特性与产量的影响[J]. 作物学报, 2007, 33(9): 1502–1507
Wang Z, Yang W Y, Wu Q L. Effects of shading in maize/soybean relay-cropping system on the photosynthetic characteristics and yield of soybean[J]. Acta Agronomica Sinica, 2007, 33(9): 1502–1507
[35] Dai Y J, Shen Z G, Liu Y, et al. Effects of shade treatments on the photosynthetic capacity, chlorophyll fluorescence, and chlorophyll content of *Tetrastigma hemsleyanum* Diels et Gilg[J]. Environmental and Experimental Botany, 2009, 65(2/3): 177–182
[36] Huang D, Wu L, Chen J R, et al. Morphological plasticity, photosynthesis and chlorophyll fluorescence of *Athyrium pachyphlebium* at different shade levels[J]. Photosynthetica, 2011, 49(4): 611–618
[37] 苏本营, 宋艳霞, 陈圣宾, 等. 大豆幼苗对套作玉米遮荫环境的光合生理生态响应[J]. 生态学报, 2015, 35(10): 3298–3308
Su B Y, Song Y X, Chen S B, et al. Photosynthetic responses of soybean (*Glycine max*) seedlings to shading caused by maize in an intercropping system[J]. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(10): 3298–3308
[38] 刘志刚. 七台河市大豆植株底荚高度增高的原因及预防措施[J]. 农业科技通讯, 2011(1): 128–130
Liu Z G. Reasons and preventive measures of the high level of the soybean plants in Qitaihe City[J]. Bulletin of Agricultural Science and Technology, 2011(1): 128–130
[39] 雍太文, 刘小明, 刘文钰, 等. 减量施氮对玉米–大豆套作系统下作物氮素吸收和利用效率的影响[J]. 生态学报, 2015, 35(13): 4473–4482
Yong T W, Liu X M, Liu W Y, et al. Effects of reduced nitrogen application on nitrogen uptake and utilization efficiency in maize-soybean relay strip intercropping system[J]. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(13): 4473–4482